

UME'DE ÜRETİLEN SICAKLIK KONTROLLÜ İNDÜKTANS STANDARDI

Turgay ÖZKAN, Gülay GÜLMEZ, Yakup GÜLMEZ, Enis TURHAN,

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), P.K.: 21 41470 Gebze-KOCAELİ
Tel: 262 646 63 55 E-mail: gulay.gulmez@ume.tubitak.gov.tr

ÖZET

İndüktans biriminin birincil seviyede elde edilmesi için UME Kapasitans Laboratuvarı'nda kurulmuş olan Maxwell-Wien İndüktans Ölçüm Köprüsü'nden elde edilen 10 mH indüktans değerinin, indüktans standartlarının sıcaklık katsayılarının 30-40 $\mu\text{H}/\text{H}$ gibi büyük değerlerde olması nedeniyle, köprünün en düşük belirsizliği ile elde etmek, uzun zamanda indüktans birimini muhafaza etmek ve uluslararası karşılaştırmalarda kullanmak amacıyla bir sıcaklık kontrollü indüktans standardı ihtiyacı oluşmuş ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sıcaklık kontrolünde dikkat edilmesi gereken izolasyon yapısının ve elektronik kontrol devresinin en iyi verimle çalışması için gerekli tasarım prensipleridir. Kısa dönemde (2-3 saat) 1 mK kararlılığa sahip olan bu indüktans standardı 1998 yılında PTB ile 10 mH değerinde yapılmış olan karşılaştırma ölçümlerinde transfer standardı olarak kullanılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu köprüde elde edilen indüktans değerinin 1σ 'da yaklaşık 4 $\mu\text{H}/\text{H}$ olduğu görülmüştür. Mekanik izolasyonu ve elektronik kontrol devresi Kapasitans Laboratuvarı'nda tasarlanmış olan bu sıcaklık kontrollü indüktans Ulusal Standart olarak diğer indüktans değerlerine referans alınacaktır. Bu bildiride anlatılacak olan, standardın yapım aşamaları ve en iyi kararlılığı elde edebilmek için dikkat edilen mekanik ve elektronik tasarım noktalarıdır.

1. GİRİŞ

UME Kapasitans Laboratuvarı'nda indüktans birimi Maxwell-Wien İndüktans Ölçüm Köprüsü kullanılarak direnç ve kapasitans birimine bağlı olarak 10 mH değerinde elde edilmektedir. Maxwell-Wien Köprüsü'nde elde edilen indüktans değerleri 1/10 İndüktans Karşılaştırma Köprüsü kullanılarak 100 μH – 10 H aralığındaki tüm indüktans değerlerine aktarılmaktadır.

Kapasitans Laboratuvarı'nda indüktans elde etme belirsizliğini düşürme çalışmaları 1996 yılında Maxwell-Wien Köprüsü'nün kurulmasından bu yana, 1997 yılında PTB ile yapılan karşılaştırmadan sonra daha da artarak, devam etmiştir. Söz konusu karşılaştırmada UME Kapasitans Laboratuvarı'nda indüktans elde etme belirsizliğinin 10 ppm ve PTB ile nominal değerler arasındaki farkın da 5 ppm olduğu görülmüştür.

İndüktans değerinin Maxwell-Wien Köprüsü'nden elde edilip diğer değerlere düşük belirsizlikle aktarılabilmesi için ilk önce referans olarak alınacak ve değeri Maxwell-Wien Köprüsü'nde belirlenecek bir indüktans standardına gereksinim vardır. Elde edilen indüktans değerinin çevre sıcaklığının değişiminden mümkün olduğunca etkilenmemesi ve mümkün olduğunca kararlı olması gereklidir. Aksi halde sıcaklık katsayısı oldukça yüksek olan (30 - 40 ppm/°C) indüktans standartlarını kullanarak yapılan ölçümler sonucunda laboratuvar

sıcaklığının ± 0.5 °C değişmesi durumunda ölçümlere gelecek olan sıcaklık belirsizliği de 30 – 40 ppm olacaktır. Böyle bir standart ile ölçümler alıp tüm indüktans değerlerini belirlemek amacıyla referans indüktans değerini belirlemek, düşürülmesi istenen Maxwell-Wien Köprüsü'nün belirsizliğinin yanında pek anlamlı görünmez.

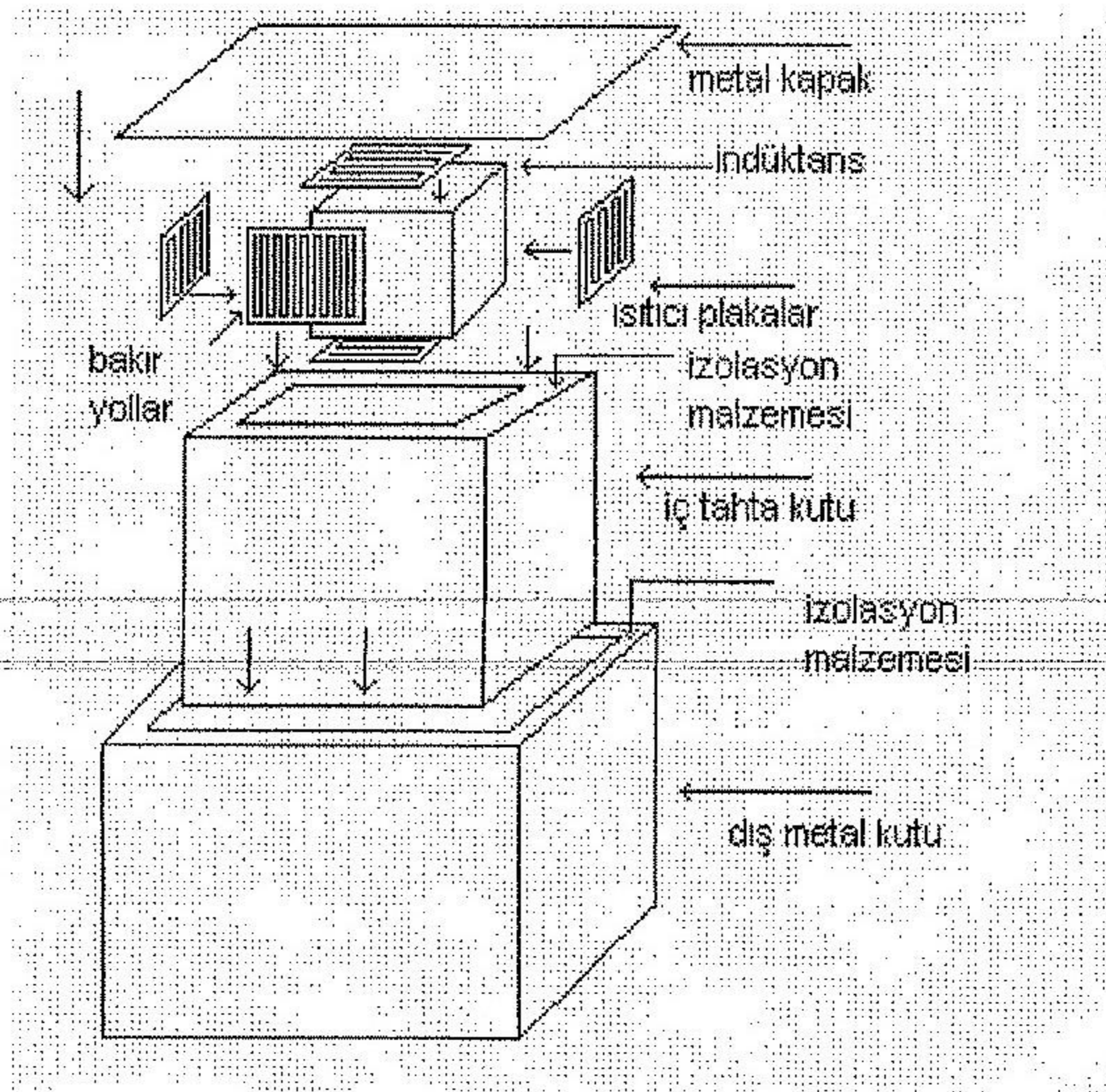
Bu anlatılmış olan nedenler, UME Kapasitans Laboratuvarı'nda hem Maxwell-Wien Köprüsü'nden indüktans biriminin elde edilmesinde hem de uluslararası karşılaştırmalarda transfer standardı olarak kullanılabilecek bir standart yapımı gerekliliğini doğurmuştur.

2. STANDARDIN YAPIMI

Söz konusu sıcaklık kontrollü indüktans standardı yapımını iki kısım olarak görebiliriz. Bunun birinci kısmı mekanik olarak sistemin tasarlanması, ikinci kısmı ise bu sisteme kumanda edecek elektronik kısmın tasarlanmasıdır.

2.1 Mekanik Kısmın Tasarımı

Herhangi bir sıcaklık kontrol sistemi tasarımında ve yapımında göz önüne alınacak en önemli sorun sıcaklığı kontrol edilmek istenen sistemin sıcaklığının yalnızca kontrol sistemi tarafından değiştirilebilmesi, dış etkenlerin sistemin sıcaklığı üzerinde etkisinin teorik olarak hiç olmaması pratik olarak ise olabildiğince az olmasıdır. Bu "olabildiğince az"lık kontrol sisteminin istenen kalitesine ve verimine göre değişim gösterir. Sistemin mekanik kısmı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sıcaklık Kontrollü İndüktansın yapısı

Çevre şartlarından bağımsız bir sıcaklık kontrol sisteminin yolu iyi bir sıcaklık izolasyonundan geçer. Bu sistemin yapımında tasarımın verimliliği açısından bu aşamaya çok fazla önem verilmiştir.

Söz konusu standardın ısıtma işlemini yerine getirmek için PCB kartında LPKF sistemi kullanılarak bakır yollar oluşturulmuştur. Yaklaşık 17 Ω direnci olan bu bakır yollar ısıtma direnci olarak kullanılmıştır. İndüktans standardının üst kapağı ısıtıcı karta tam olarak temasın sağlanabilmesi amacıyla yerine düz bir kapak takılması için sökülmüştür. Bu tam teması sağlayan düz kapakta eski terminal yapılarının yerini indüktansın kablolarının ve indüktans içindeki sıcaklık değerinin elektronik olarak ve gözle izlenebilmesi sağlayacak olan 2 adet NTC (negative temperature coefficient resistor)'nin kablolarının geçebilmesini sağlayan delikler almıştır. Bu delikler aynı zamanda üst kapağı ısıtmak için konulan plakanın üzerinde de açıldı. Bu işlemlerin ardından indüktans standardının 6 yüzü de ısıtıcı plakalarla kaplanmıştır. Plakalar, indüktansa temaslarının iyice sağlanabilmesi için yüksek sıcaklığa dayanıklı bantlarla sıkıca sarılmıştır.

Bu ilk çekirdek yapının oluşturulmasının ardından, ısıtılma işlemi yapılabilecek olan bu yapının sıcaklığını koruyabilmesi için gereksinimi olan izolasyon yapısının tasarım ve yapım aşamalarına geçilmiştir. Boyutlarının tam olarak belirlenmesinin ardından bu yapıyı içine sıkı bir şekilde alabilecek içi mavi köpük olan tahta bir kutunun yapımına karar verilmiştir. İndüktans kutunun içine sıkıca yerleştirildi ve mavi köpükler arasında oluşmuş olan boşluklar elyaf ile dolduruldu. Son olarak kutunun kapak kısmı da elyaf ile desteklenerek kapatılmış ve birincil izolasyonu ile birlikte sistem tamamlanmıştır. Bunun dışına hem kutunun taşınabilir ve dış darbelerle karşı korunaklı olması ve basit ama ikincil bir izolasyon sağlayabilmesi için hem de elektrostatik ekranlama sağlanması için uygun boyutlarda metal bir kutu tasarlanmıştır. Tahtadan yapılmış olan kutu bu metal kutunun içine konuldu ve sistem mekanik olarak tamamlanmış oldu. Bu arada elektronik elemanlar da tahta kutunun üst yüzeyine hareket etmeyecek şekilde monte edildi.

2.2 Elektronik Kısımın Tasarımı

Elektronik tasarımın yapılmasından önce sıcaklık kontrol sisteminin elektronik kısmının çalışma prensibini belirleyecek olan otomatik kontrol metotları üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Söz konusu çalışma için lineer sürekli kontrol modu seçilmiştir. on-off türü bir otomatik kontrol uygulaması ancak sistemin belli bir sıcaklık salınımı içinde kontrolünü sağlayabilecektir. Lineer sürekli kontrol modu ile elektronik devreden elde edilebilecek maksimum hassasiyeti kararlılığa aktarma imkanı verecektir. Burada tek bir sıcaklıkta indüktans standardının değeri belirlenmek istenmektedir. Bu yüzden kontrol sisteminin tek bir noktada elektronik devrenin hassasiyeti artırılması tercih edilmiştir. Bu nedenle sistemin AC kazancı maksimuma çıkarılmış, DC kazancı minimum düzeyde tutulmuştur. Eğer çok noktada sabit kontroller yapılması gereken bir uygulama olsaydı, sistemin DC kazancının maksimuma çıkması AC kazancının minimuma çekilmesi gerekecek böyle bir uygulama da doğal olarak AC kazancının düşürülmesi nispetinde hassasiyetinden kaybedecektir. Bu genel prensipler dikkate alınarak kontrol modları incelenmiş kontrol modları avantaj ve dezavantajları göz önüne alınarak incelenmiştir.

2.2.1 Oransal Kontrol (P)

Bu mod şu eşitlikle ifade edilebilir.

$$p = K_p e_p + p_0 \quad (1)$$

K_p : Hata ile kontrol çıkışı arasındaki oransal kazanç

p_0 : Hata olmadığı durumdaki kontrol çıkışı

İstenen kontrol noktasından sapma r-b olsun. Bu, ölçülen değer istenen değer üstüne çıkarsa hata terimi negatif olur ve bu da kontrol çıkışının azalmasına neden olur demektir. Ölçüm değeri istenen değer altında olursa kontrol çıkışı da artacaktır.

Bu kontrol durumu fazlaca değişimin olmadığını garanti edilebileceği veya kontrol sürecinin çok kısa süre aldığı ve bu durumda da fazlaca bir değişime mahal bırakılmayan sistemlerde kullanılabilir. Eğer sistemin yükünde büyük bir değişiklik olursa bu durumda sistem yeni bir durumda belli bir ofset hata ile dengeye gelir ve eski denge durumuna geri dönemez.

Eğer oransal bant genişliği, yani kontrol edilen sistemin değişebilme aralığı yeteri kadar dar ise bu durumda sistem sanki on/off kontroldeymiş gibi çalışır.

2.2.2 Oransal-Türevsel Kontrol (PD)

Bu kontrol modu şu şekilde ifade edilebilir:

$$p = K_p e_p + K_p K_D \frac{de_p}{dt} + p_0 \quad (2)$$

Sistemin giriş değişikliğine karşı vereceği cevabın çok hızlı olması durumlarında kullanılan bir moddur. Fakat büyük değişikliklerin ardından ortaya çıkabilecek olan ofset hatanın ortadan kaldırılması bu modda sağlanamaz. Bu durumda belli bir ofset hataya tahammülü olan sistemler için böyle bir kontrol modunun düşünülmesi mümkündür.

2.2.3 Oransal-İntegratif Kontrol (PI)

Bu mod sistemin ölçülen değerinde büyük ve sık değişiklikler olduğu durumda oransal kontrolde ortaya çıkacak olan ofset hatayı ortadan kaldırır. Sistemin girişindeki ani değişikliklerin sistemde kararsızlıklara yol açmasını engeller fakat girişte oluşabilecek değişikliklere sistemin cevabının yavaş olması bu modun dezavantajıdır. Bu mod aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$p = K_p e_p + K_p K_i \int_0^t e_p dt + p_i(0) \quad (3)$$

Formülde görüldüğü gibi integrasyon kazancı oransal kazançtan bağımsız olarak ayarlanabilir.

2.2.4 Oransal-İntegratif-Türevsel Kontrol (PID)

Anlatılmış olan tüm lineer kontrol modlarının bileşimidir ve en karmaşık yapıya sahip olan moddur. Şu eşitlikle ifade edilebilir:

$$p = K_p e_p + K_p K_i \int_0^t e_p dt + K_p K_D \frac{de_p}{dt} + p_i(0) \quad (4)$$

Bu kontrol modunda türevsel kontrolden gelen giriş değişime karşı hızlı cevap, integratif kontrolden gelen ofset hatanın ortadan kaldırılması olanakları mevcuttur.

Yukarıda anlatılan tüm modların incelenmesinin ardından yapılacak olan sıcaklık kontrolünün ne gibi özelliklere sahip olması gerektiği düşünülmüştür. Sıcaklık kontrolü yapılacak olan sistemin bir indüktans olduğu göz önüne alınırsa sistemin istenen sıcaklık değerinden sapma göstermesi istenmez. Bu durumda yalnızca oransal kontrol kullanmak yurtdışına da gönderilmesi planlanan bu sistemin dış ortam sıcaklığının ani değişikliklerine maruz kalacağı düşünülmürse pek mantıklı olmaz. Bu gerekçe ile ofset hatayı ortadan kaldıramayan PD kontrol yapılması da düşünülemez. Söz konusu ofset hatanın ortadan kaldırılabilceği iki mod PI ve PID bu sistemin kontrolü için kullanılabilecek kontrol modlarıdır. Fakat PID modunda elimize geçen fazladan özellikler de vardır. Mesela sistemimizin yalnızca tek sıcaklıkta yani laboratuvar sıcaklığında iken dengeye gelmesi istendiği için ve PID modunu elektronik olarak çalıştırmak PI moduna göre daha zor olduğundan dolayı zaman ve maliyet tasarrufu olarak PI kontrolünün yapılması en uygun çözüm olarak düşünülmüştür.

Elektronik tasarımda kullanılan devreler sırasıyla; akü doldurma devresi, 15 V güç kaynağı devresi ve sıcaklık kontrol devresidir. Devrelerin anlatımında bu değerlerden ziyade daha çok prensipler göz önüne alınmıştır.

Akü doldurma devrelerinde en önemli özellik akünün yüksek akım çekme isteğine karşı devrenin kısa devre akım koruma özelliği ve devrenin yük regülasyon özelliğine sahip olmasıdır. Bu, iki transistörün içinde bulunduğu devre parçacığı ile sağlanır. Kullanılan akülerin 6 Amper ile doldurulabilmelerine karşılık akülerin ömürlerini uzatmak için bu akımın 1.5 A 'de tutulmasına karar verilmiştir. Yük regülasyonu için yük üzerinden geri besleme alınır ve devre çıkış gerilimi azalıyorsa artıracak yönde, yük gerilimi artıyorsa azalacak yönde geri besleme yapar.

Güç kaynağı devresindeki amaç istenilen akım büyüklüklerinde kararlı gerilimleri istenilen devrelere uygulayabilmektir. Güç kaynağı devresinde kararlı gerilim elde edilebilmesi için referans gerilim kaynağı kullanılmaktadır. Referans gerilim LM399 zener diyotundan elde edilmiştir. Normal olarak LM399 1-20 mA aralığında çalıştırılabilir. Fakat söz konusu zenerin kararlı çalıştırılması 1.3 – 2 mA arasında mümkündür ve referans gerilim devresi bu prensipler dikkate alınarak tasarlanmıştır. Kısa dönem kararlılığı 1ppm olan 6.95 V değerindeki zener geriliminden +5 V ve - 5 V değerlerinde sıcaklık kontrol devresinde kullanılacak olan referans gerilimleri elde edilmiştir.

Sıcaklık kontrol devresi üzerinde en fazla durulması gerekli olan devredir. Burada, yukarıda bahsedilmiş olan PI kontrol mantığı kullanılmıştır. Bu mantığa istinaden devrede oransal kontrolü sağlamak için bir işlemsel kuvvetlendirici (opamp), integratif kontrol aşaması içinse bir integratör kullanılmıştır. Devrede ayrıca performans artırıcı önlemler alınmıştır.

Devrede istenen sıcaklık seviyesini algılamak üzere NTC'den faydalanılmıştır. Kullanılacak olan NTC UME Sıcaklık Laboratuvarı'nda kalibre edilmiştir. İndüktans standardının tutulması gereken sıcaklık değeri Maxwell-Wien İndüktans Ölçme Köprüsü'nde kullanılan diğer elemanlara göre yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada etkin olan eleman köprüde kullanılan değişken kapasitördür. Bu değişken kapasitörün çözünürlüğü iyi olan ve değerinin ayar kolunun değişimiyle en fazla lineer değiştiği bölgede kullanılabilmesi durumunda sözkonusu olacak kapasitans değeri 0.6 pF civarında olacaktır. Buradan Maxwell-Wien denkleminde köprü elemanlarının değerlerini koyduğumuzda indüktans değeri yaklaşık olarak 10.004 mH olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşı düşen yaklaşık sıcaklık değeri ise, indüktansın sıcaklık katsayısının 39.20 ppm/°C, 30.83 mΩ/°C olduğu ve indüktansın normal sıcaklıktaki (23°C) değerinin 9.999 mH civarında olduğu düşünülmürse, yaklaşık olarak 33 °C civarındadır. Bu sıcaklık değerine karşılık gelen NTC direnç değeri devrede

algılanması gereken direnç değeri olarak karşımıza çıkmaktadır. İndüktans standardının sıcaklığının belirtilen bu sıcaklık değerinin civarında olması yeterlidir. Burada önemli olan sıcaklık kontrolünü o makul bir sıcaklıkta olabildiğince sabit tutmaktır.

Kullanılan sıcaklığa karşı düşen NTC direnç devrede bir Wheatstone köprüsünde kullanılmaktadır. Bu köprünün bir tarafında birbirine eşit değerde iki direnç diğer tarafında ise NTC ve NTC'nin alması gerekli olan direnç değerine eşit bir direnç bulunmaktadır. Bu devrenin verimli çalışması için ilk başta yapılması gereken, birbirine eşit olan iki direncin gerçekten eşit olarak devreye konulmasıdır. Bu değer eşitleme işlemi de söz konusu dirençlere öz direnci yüksek sıcaklık katsayısı düşük özel alaşım tel sarılarak sağlanmıştır. Bu eşitlik en iyi şekilde sağlandıktan sonra Wheatstone köprüsünün en fazla verimle çalışması beklenebilir. Bu köprünün çıkışında dengesizlik gerilimi AD625 hassas kuvvetlendirici (instrumentation amplifier) kullanılarak kuvvetlendirilmiştir.

AD625 hassas kuvvetlendirici yapısı, kazancı girişine bağlanan dirençlerle 100000'e kadar arttırılabilen bir kuvvetlendirici yapısıdır. Üç opamptan oluşan bir fark kuvvetlendirici yapısıdır. Söz konusu opampların akım kaynakları ile beslenmesi kararlılığı arttırmaktadır. Söz konusu kuvvetlendiricinin verimli olarak çalıştırılması için önce kuvvetlendiricinin giriş ve çıkış ofset ayarlarının yapılması gereklidir. Giriş ofset ayarı kuvvetlendiricinin 3 ve 4 numaralı bacakları arasında bağlı bulunan ayarlı direnç yardımıyla yapılır. Direncin ayarlanması ile (+) ve (-) girişleri arasındaki gürültü gerilimi sıfırlanır, ya da en aza indirilir. Çıkış ofset ayarı ise 13 ile 14 numaralı bacaklar arasında bağlı bulunan ayarlı direnç yardımıyla yapılır. Bu ayar sonucunda girişler arasında herhangi bir gerilim farkı bulunmadığı durumda çıkışta sıfır gerilim alınması sağlanmış olur. Bu giriş ve çıkış ofset ayarlarının yapılmasıyla kuvvetlendiricinin daha verimli kullanılması sağlanmıştır.

Bu katın ardından kullanılan bir integratör yapısıdır. Bu yapı aynı zamanda bir Lag-Lead filtre yapısıdır. Bu filtrenin frekans-genlik cevabında genlik kararlı olarak değişmeden kalmaktadır. Teorik olarak Lag-Lead filtre aynı zamanda giriş ile çıkış arasında da istenmeyen bir faz farkının oluşmasını önleyecek yapıda çalışmaktadır. Bu özellikler sistemin integratör özelliğinin sağlıklı çalışmasına sağlamaktadır. Daha önce de anlatılmış bulunan kontrol modlarına göre bu katın amacı sistemdeki hataların hızlı değişiminin yavaşlatılmasıdır. Buna göre hızlı değişimlerle sistem kararsızlığa girmemektedir.

Bu katta kullanılan LF356 opampının giriş ofset ayarı da 1 ve 5 numaralı bacaklara bağlı bulunan ayarlı direnç yardımıyla yapılmaktadır. Aksi halde sistemin giriş işaretine karşı cevabı bir rampa fonksiyonu üzerine bindirilir ve besleme gerilimi değerinde sistem doymaya girer.

Bundan sonraki katta kullanılan opamp gene LF356'dır. Bu katta yapılan bir toplama işlemidir. 47 k Ω üzerinden bir gerilim değeri verilir ve gelen hata değeri bu gerilim değeri toplanarak çıkışa yansır. Bu durumda hiçbir hata terimi gelmese dahi sistem, çıkışa belli değerde bir akım sağlayacaktır. Bu da yükün belli bir sıcaklık değerinin altına düşmemesini sağlar. Kontrol yapılan bölge bu sıcaklık değerinin üstünde kalmış olur.

Son katta bulundurulmuş iki transistörle yükü sürmek için gerekli olan akım değeri sağlanır.

3. SONUÇ

UME Kapasitans Laboratuvarı'nda yapılmış bulunan sıcaklık kontrollü indüktansın değerinin belirlenmesi için ölçümler alınmıştır. Söz konusu ölçümlere ilk olarak PTB ile yapılan 10 mH değerinde indüktans karşılaştırması ile başlanmıştır. Söz konusu karşılaştırma sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sıcaklık kontrollü indüktans kullanılarak PTB ile yapılan 10 mH indüktans karşılaştırması sonuçları

Enstitü	Tarih	L_3
PTB	12.11.1998	$10.004381 \pm 5.62 \times 10^{-6}$ mH
UME	23.12.1998	$10.004379 \pm 4.68 \times 10^{-6}$ mH

Bu ölçüm sonuçları güvenilirlik katsayısı $k=1$ durumunda yalnızca A tipi belirsizlikle ifade edilmiş sonuçlardır. Bu belirtilen A tipi belirsizliğin yanında indüktans değerinin elde edildiği kapasitans ve direnç belirsizlikleri de hesaba katılarak tüm belirsizlik değeri elde edilir. Bu noktadan sonra yapılacak olan indüktans değerinin Maxwell-Wien Köprüsü'nde düzenli olarak ölçülerek bir tarihçesinin oluşturulması ve 1/10 Karşılaştırma Köprüsü kullanılarak yapılacak düzenli ölçümlerle 100 μ H – 10 H arasındaki indüktans değerlerine aktarılması ve tüm indüktans değerlerinin tarihçelerinin oluşturulmasıdır.